

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Filip Flego**

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Boris Ljubenkov, dipl. ing.

Student:

Filip Flego

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Filip Flego



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Flego**

Mat. br.:0035172200

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE AH 32**  
Naslov rada na engleskom jeziku: **TESTING OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE HIGH TENSILE STEEL AH 32**  
Opis zadatka:

Mehanička svojstva stvarno ugrađenog čelika u trup broda mogu se razlikovati od nominalnih. Radi toga je potrebno ispitati mehanička svojstva uzoraka materijala određenog broda koji se provodi statičkim vlačnim postupkom.

U radu je potrebno:

1. Prikazati statički vlačni pokus, mjernu opremu i uzorak za ispitivanje.
2. Prikazati rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava čelika povišene čvrstoće AH 32.
3. Usporediti rezultate ispitivanja sa rezultatima ispitivanja brodograđevnog čelika i čelika povišene čvrstoće AH 36.

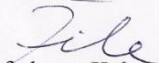
Zadatak zadan:  
16. studenog 2012.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 15. veljače 2013.  
**2. rok:** 11. srpnja 2013.  
**3. rok:** 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.  
**2. rok:** 15., 16. i 17. srpnja 2013.  
**3. rok:** 18., 19., i 20. rujna 2013.  
Predsjednik Povjerenstva:

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Boris Ljubenkovic

  
Prof. dr. sc. Kalman Žiha

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IIIV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. STATIČKI VLAČNI POKUS.....	2
2.1. Općenito.....	2
2.1.1. Uzorak za ispitivanje.....	7
2.1.2. Mjerna oprema .....	9
2.2. Provedba pokusa .....	12
3. REZULTATI ISPITIVANJA STATIČKIM VLAČNIM POKUSOM .....	14
3.1. Brodograđevni čelik povišene čvrstoće AH 32.....	14
3.2. Nominalne vrijednosti čelika povišene čvrstoće AH 32 .....	19
4. USPOREDBA MEHANIČKIH SVOJSTAVA BRODOGRAĐEVNIH ČELIKA .....	21
5. ZAKLJUČAK.....	23
LITERATURA.....	24

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Tijek statičko vlačnog ispitivanja.....	2
Slika 2.	Dijagram <i>sila - produljenje</i> .....	3
Slika 3.	Dijagram <i>naprezanje - istezanje</i> .....	4
Slika 4.	Stvarni dijagram <i>naprezanje - istezanje</i> .....	6
Slika 5.	Dimenzije epruveta okruglog presjeka.....	7
Slika 6.	Epruvete okruglog presjeka.....	8
Slika 7.	Kidalica Messphysik Beta 50-5.....	9
Slika 8.	Markeri na epruveti .....	10
Slika 9.	Videoekstenzometar .....	10
Slika 10.	Programsko sučelje videoekstenzometra.....	11
Slika 11.	Programsko sučelje videosekstenzometra – prikaz vrata .....	13
Slika 12.	Prikaz epruvete nakon loma .....	13
Slika 13.	Dijagram <i>sila - produljenje</i> za 1. epruvetu.....	15
Slika 14.	Konvencionalni dijagram <i>naprezanje – istezanje</i> za 1. epruvetu.....	15
Slika 15.	Stvarni dijagram <i>naprezanje – istezanje</i> za 1. epruvetu.....	15
Slika 16.	Dijagram <i>sila - produljenje</i> za 2. epruvetu.....	16
Slika 17.	Konvencionalni dijagram <i>naprezanje – istezanje</i> za 2. epruvetu.....	16
Slika 18.	Stvarni dijagram <i>naprezanje – istezanje</i> za 2. epruvetu.....	16
Slika 19.	Dijagram <i>sila – produljenje</i> za 3. epruvetu .....	17
Slika 20.	Konvencionalni dijagram <i>naprezanje – istezanje</i> za 3. epruvetu.....	17
Slika 21.	Stvarni dijagram <i>naprezanje – istezanje</i> za 3. epruvetu.....	17
Slika 22.	Konvencionalni dijagram <i>naprezanje – istezanje</i> za sve tri epruvete .....	18
Slika 23.	Stvarni dijagram <i>naprezanje – istezanje</i> za sve tri epruvete .....	18

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Dimenzije za izradu epruveta .....	8
Tablica 2. Dimenzije epruveta korištenih u eksperimentu .....	12
Tablica 3. Rezultati statičkog vlačnog pokusa čelika AH 32 .....	14
Tablica 4. Nominalne vrijednosti mehaničkih svojstava čelika AH 32 prema HRB-u.....	19
Tablica 5. Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti čelika AH 32 .....	19
Tablica 6. Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti običnog brodograđevnog čelika.....	21
Tablica 7. Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti čelika AH 36 .....	22
Tablica 8. Usporedba odstupanja vrijednosti stvarnih mehaničkih svojstava brodograđevnih čelika u odnosu na nazivne pripadne vrijednosti.....	22

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F	N	Sila razvlačenja
$L_0$	mm	Početna duljina epruvete
$d_0$	mm	Početni promjer vrata epruvete
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
$d_1$	mm	Promjer glave epruvete
h	mm	Duljina glave epruvete
$L_c$	mm	Duljina ispitnog dijela epruvete
r	mm	Prijelazni polumjer
$L_u$	mm	Ukupna duljina epruvete
$\Delta L$	mm	Konačno produljenje epruvete
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Naprezanje
$F_m$	N	Maksimalna sila razvlačenja
$F_e$	N	Sila razvlačenja
$F_k$	N	Sila pri kojoj dolazi do loma epruvete
$\varepsilon$		Relativna deformacija
$\varepsilon_{Atr}$		Trajna (plastična) deformacija
$\varepsilon_{Ael}$		Elastična deformacija
$\varepsilon_m$		Deformacija pri maksimalnom opterećenju
$\varepsilon_u$		Ukupna deformacija nakon kidanja
E	N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća
$R_e^h$	N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja (gornja)
$R_k$	N/mm <sup>2</sup>	Konačno naprezanje



## SAŽETAK

Nova istraživanja pokazuju da neka mehanička svojstva materijala mogu odstupati od svojih pripadajućih nominalnih vrijednosti. Iz tog je razloga provedeno ispitivanje brodograđevnog čelika povišene čvrstoće, oznake AH 32 (high tension steel) po Hrvatskom registru brodova, statičkim vlačnim pokusom, kako bi se utvrdilo postoji li razlika između nominalnih i stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika.

U uvodnom dijelu će biti navedeni razlozi provedbe statičkog vlačnog pokusa, dok će se u 2. poglavlju detaljno objasniti provedba statičkog vlačnog pokusa, potrebna mjerna oprema te izrada i geometrijske karakteristike uzorka za ispitivanje. Zatim će se u 3. poglavlju prikazati rezultati ispitivanja statičkim vlačnim pokusom za 3 različita uzorka čelika povišene čvrstoće AH 32. Usporedit će se srednje vrijednosti dobivenih mehaničkih svojstava s pripadajućim nominalnim vrijednostima, odnosno postotak odstupanja od nominalnih vrijednosti. Konačno, 4. poglavlje će se baviti rezultatima ispitivanja drugih brodograđevnih čelika, također ispitanih na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Prikazat će se i njihov postotak odstupanja od pripadajućih nominalnih vrijednosti te će se uporediti međusobna odstupanja njihovih relevantnih mehaničkih svojstava.

Ključne riječi: mehanička svojstva materijala, statički vlačni pokus, čelik povišene čvrstoće AH 32, ostali brodograđevni čelici

## SUMMARY

Recent research shows that some mechanical properties may deviate from their nominal values. Due to this, experiments on high tension steel, marked AH 32 based on the Croatian Register of Shipping, are carried out using static tensile tests in order to determine if there is a significant difference between the nominal and the real values of the material's yield and tensile strength.

The exact reasons for conducting the static tensile test will be explained in the introduction, while the second part of the thesis will show a detailed explanation of the procedures involved in the test, the necessary equipment and the procedures of making the samples of high tension shipbuilding steel "AH 32". In the third part of the thesis the results of the static tensile experiment for three different samples of high tension steel will be displayed. There will be a comparison of the mean values of the relevant mechanical properties obtained from the conducted test with their nominal values, as well as the percentage of the deviation between the two. Finally, the fourth part of the thesis will deal with the results of different shipbuilding steels which underwent the same test in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. The percentage of the deviation of their mechanical properties with regards to the nominal values of those same properties will be displayed. Also, there will be a comparison of the deviation for each mechanical property.

Key words: mechanical properties of materials, static tensile test, high tension steel "AH 32", different shipbuilding steels

## 1. UVOD

Poznato je da se mehanička svojstva stvarno ugrađenog čelika u trup broda mogu ponekad razlikovati od nominalnih vrijednosti. Stoga se provode eksperimentalna statička i dinamička ispitivanja uzoraka materijala, kako bi se dobio bolji uvid u ponašanje samog materijala tijekom njegove eksploatacije i kako bi se sa sigurnošću utvrdilo da ispunjava sve zahtjeve koji se na njega postavljaju.

Do sada su se svojstva materijala u brodogradnji najčešće definirala u fazi preliminarne projektiranja i kao takva koristila kroz cijeli proces projektiranja, gradnje i službe broda. U nedavnim istraživanjima koje je proveo ABS (American Bureau of Shipping) ustanovljeno je da su stvarne vrijednosti mehaničkih svojstava čelika 5 do 15 % viša od nominalnih koji se koriste u proračunima. Dakle, može se zaključiti da su mehanička svojstva čelika s vremenom porasla što se može pripisati utjecaju mikrolegiranja i unaprijeđenju tehnologije valjanja u čeličanicama. Bolja mehanička svojstva daju i dodatnu sigurnost, pogotovo u plovidbi po zahtjevnim vremenskim uvjetima, što je prilično značajno jer je mjerenjima pokazano da je ponekad stvarni moment savijanja brodskog trupa veći od proračunatog.

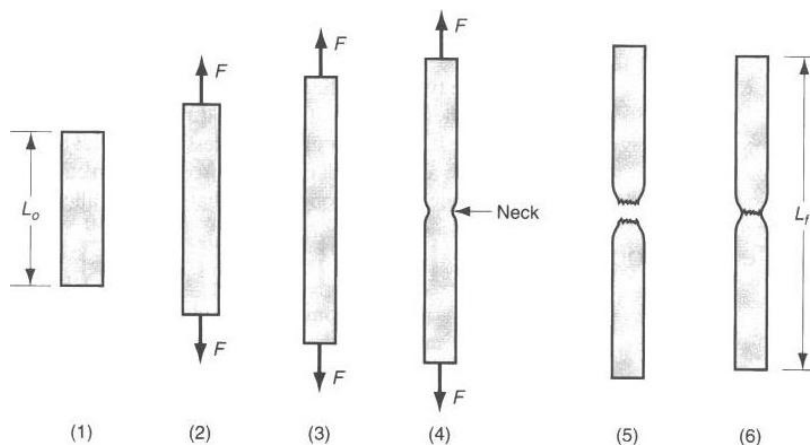
Ispitivanja provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pokazala su slična odstupanja i kod čelika povišene čvrstoće AH 36 i kod običnog brodograđevnog čelika pa će se pokušati utvrditi vrijede li približno ta odstupanja i kod čelika AH 32.

## 2. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE

### 2.1. Općenito

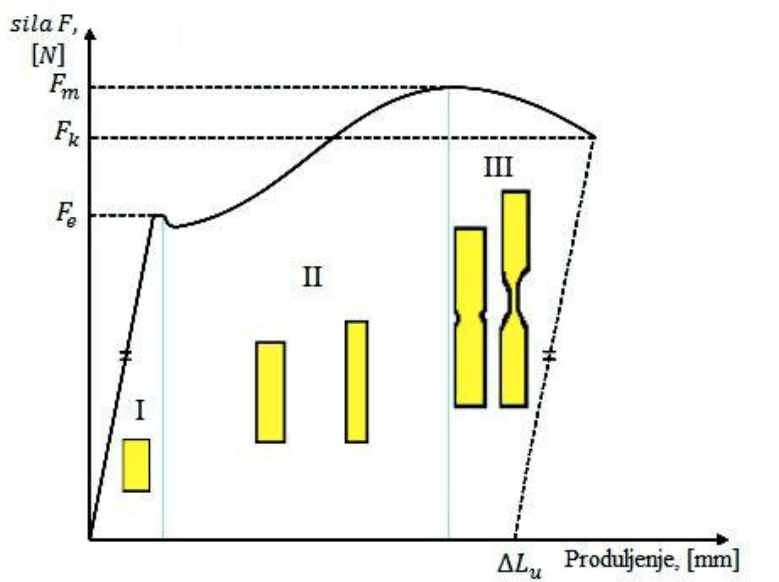
Statički vlačni pokus se provodi radi utvrđivanja mehaničkih svojstava materijala. Pritom se ispituje njegovo ponašanje u elastičnom i plastičnom području u uvjetima jednoosnog statičkog naprezanja. Sama ispitivanja se odvijaju na uređajima za opterećivanje (kidalice) na kojima se postave uzorci materijala (epruvete) čije su geometrijske karakteristike propisane standardima. Zatim su podvrgnute kontinuiranim vlačnim opterećenjem do pojave loma, a utvrđena mehanička svojstva su vlačna čvrstoća, granica razvlačenja (gornja) i konačno naprezanje na kojoj je nastupio lom. Naprezanje i istezanje su dva glavna parametra iz kojih se računa većina mehaničkih svojstava tijekom jednoosnog testiranja.

U statičkom vlačnom pokusu se koriste uzorci (epruvete) okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. U ovom slučaju su korištene okrugle epruvete koje na svojim krajevima imaju zadebljanja koje se učvrste u čeljusti kidalice gdje se provodi statičko vlačno ispitivanje. Djelovanjem sile  $F$  na epruvetu početne duljine  $L_0$ , dolazi do produljenja epruvete, što za posljedicu ima promjenu promjera od vrijednosti  $d_0$  do  $d$ , sve do pojave loma epruvete kako je prikazano slikom 1.



Slika1. Tijek statičko vlačnog ispitivanja

Za vrijeme provođenja pokusa podaci se šalju u računalo koje crta dijagram *sila – produljenje* prikazano slikom 2 iz kojeg se kasnije određuje dijagram *naprezanje – istezanje*.



**Slika 2. Dijagram sila- produljenje**

Prvi dio dijagrama prikazuje linearnu ovisnost sile i produljenja, što vrijedi sve do vrijednosti sile  $F_e$  (sila na granici tečenja ili sila razvlačenja). U drugom dijelu dijagrama nakon sile razvlačenja, nestala je linearna ovisnost između povećanja sile i produljenja. Opterećenje raste sve do dostizanja maksimalne sile  $F_m$ , nakon kojeg se u trećem dijelu dijagrama epruveta nastavlja produljivati uz sve manju silu. Pri dostizanju konačne sile  $F_k$  dolazi do loma epruvete.

Potrebno je uzeti u obzir površinu poprečnog presjeka uzorka uz iznos sile pri statičkom vlačnom ispitivanju jer se u protivnom ne dobije uvid u ponašanje materijala. Stoga se uvodi pojam naprezanje prema izrazu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \frac{N}{mm^2}$$

gdje je :

- $F$  – sila izražena u N
- $S_0$  – površina početnog presjeka u  $mm^2$

Konačno produljenje  $[\Delta L]$  ispitane epruvete nakon kidanja iznosi:

$$\Delta L = L_u - L_0$$

Ako se produljenje  $\Delta L$  podijeli s početnom mjernom duljinom  $L_0$  dobiva se izraz za relativno produljenje ili istezanje  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \frac{mm}{mm}$$

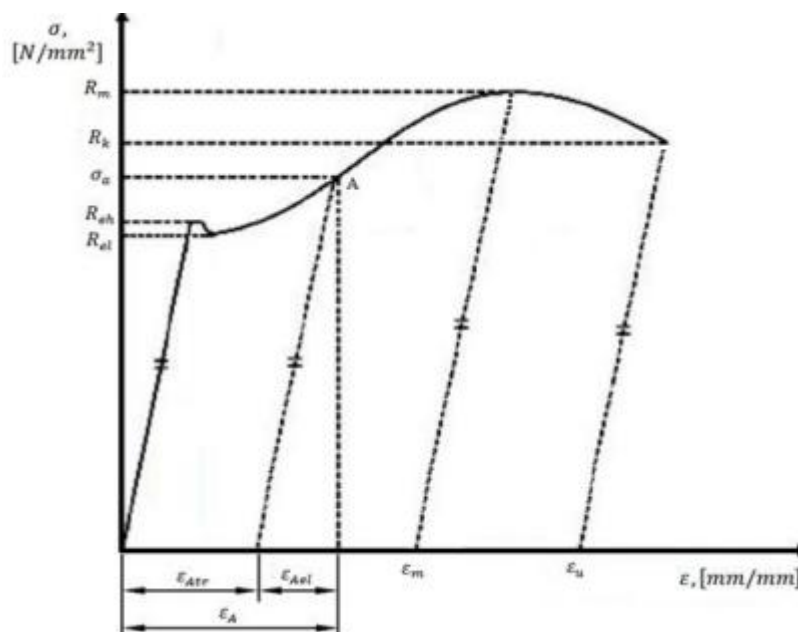
Na taj se način iz dijagrama *sila – produljenje* dobije dijagram *naprezanje – istezanje* prikazan slikom 3. On je samo kvalitativno jednak dijagramu  $F - \Delta L$  pošto se svi iznosi sile dijele istom vrijednošću  $S_0$ , a sve vrijednosti produljenja vrijednošću  $L_0$ .

Dijagram *naprezanje – istezanje* počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hookeovim pravcem i za kojeg vrijedi:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \frac{N}{mm^2}$$

gdje je :

- $E$  – Youngov modul elastičnosti



Slika 3. Dijagram *naprezanje – istezanje*

Modul elastičnosti predstavlja nagib krivulje u elastičnom području; što je veći, za isto istezanje  $\varepsilon$  bit će potrebno veće naprezanje  $\sigma$ , odnosno nagib Hookeova pravca bit će strmiji. U tom području materijal je deformiran isključivo elastično što znači da je trajna deformacija u slučaju rasterećenja ( $\sigma = 0$ ) jednaka nuli pa i razmak mjernih točaka na epruveti ostaje jednak  $L_0$ . Modul elastičnosti za čelike iznosi oko  $210\,000\text{ N/mm}^2$ , 3 puta veći od modula elastičnosti aluminija koji iznosi oko  $70\,000\text{ N/mm}^2$ .

Hookeov pravac završava granicom razvlačenja  $R_e$ , nakon koje se epruveta produljuje bez povećanja naprezanja. U tom kratkom periodu vrijedi:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \frac{N}{\text{mm}^2}$$

gdje je:

- $R_e$  - granica razvlačenja
- $F_e$  – sila tečenja
- $S_0$  – površina početnog presjeka epruvete.

Granica razvlačenja je naprezanje kod kojeg materijal počinje teći bez povećanja naprezanja. Prema njoj se, uz odabranu sigurnost, utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu nekog uređaja. Karakteriziraju ju dvije vrijednosti prikazano slikom 3; gornja granica razvlačenja  $R_e^h$  i donja granica razvlačenja  $R_e^l$ . Nakon što materijal prijeđe granicu razvlačenja ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija.

Naprezanje koje se ostvaruje kod maksimalne sile naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom i jednako je :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \frac{N}{\text{mm}^2}$$

To naprezanje se nikako ne smije zvati maksimalno naprezanje jer se površina presjeka epruvete od trenutka postizanja maksimalne sile počinje smanjivati, ali naprezanje i dalje raste. Dostizanjem vrijednosti  $R_m$  deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj duljini već se lokalizira na jednom mjestu i nastaje tzv. vrat.

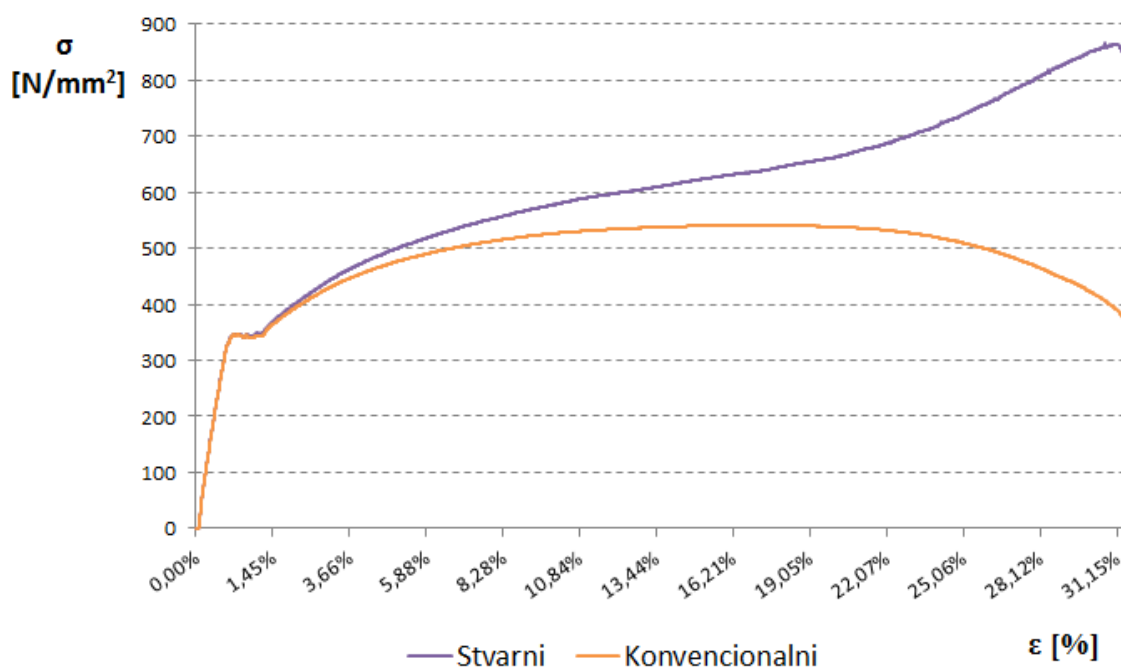
Do loma epruvete dolazi kad naprežanje dosegne vrijednost konačnog naprežanja  $R_k$ :

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \frac{N}{mm^2}$$

Dijagram *naprežanje – istezanje* prikazan slikom 3 naziva se konvencionalni dijagram čiji tijek kvalitativno odgovara dijagramu *sila – produljenje*. Takav dijagram nije stvarni dijagram *naprežanje – istezanje* jer se iznosi naprežanja dobivaju pomoću izraza:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

gdje je  $S_0$  površina početnog presjeka epruvete, što znači da je naprežanje dobiveno tim izrazom točno samo ako se računa za područje elastičnih deformacija. U području plastičnih deformacija površina poprečnog presjeka se smanjuje pa je stvarno naprežanje ( $\sigma_s$ ) veće od konvencionalnog. Prikaz stvarnog dijagrama *naprežanje – istezanje* u odnosu na konvencionalni prikazan je slikom 4.



Slika 4. Stvarni dijagram *naprežanje – istezanje*



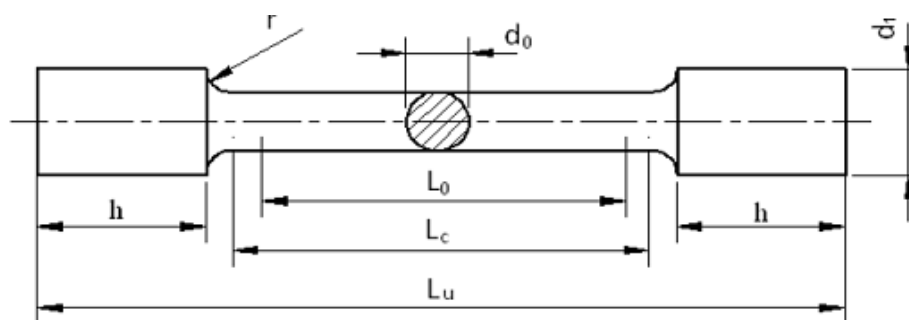
### 2.1.1. Uzorak za ispitivanje

Svojstva materijala se moraju ispitati normiranim, odnosno propisanim metodama. Osim propisa poput mjernog uređaja, postupka ispitivanja (redoslijed, način mjerenja i računanja), stanja okoline (temperatura, vlažnost) i načina iskazivanja rezultata, jako je bitno propisati i uzorak ili tzv. epruvetu samog ispitanog materijala (oblik, dimenzije, stanje). Materijal, odnosno lim iz kojeg se izrezuju epruvete dobiven je iz brodogradilišta, a najčešće potječe od teretnog prostora broda u blizini glavnog rebra jer su u tom području očekuju najveći momenti savijanja. Uzorci se izrezuju u smjeru valjanja (uzdužno) otprilike 15mm od ruba lima metodom vodenog mlaza kako bi se sačuvala mehanička svojstva materijala, a obrađuju se na propisane dimenzije prema određenom standardu.

U ovom će ispitivanju biti korištene epruvete okruglog presjeka, napravljene od čelika povišene čvrstoće, izrađene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku.

Veličine koje karakteriziraju dimenzije epruvete prikazane su slikom 5.

- $d_0$  - početni promjer vrta epruvete, mm
- $d_1$  - promjer glave epruvete, mm
- $h$  - duljina „glave“, mm
- $L_0$  - početna mjerna duljina epruvete, mm
- $L_u$  - ukupna duljina epruvete, mm
- $L_c$  - duljina ispitnog dijela epruvete, mm
- $S_0$  - početna površina presjeka epruvete, mm<sup>2</sup>
- $r$  - prijelazni polumjer, mm



Slika 5. Dimenzije epruvete okruglog presjeka

Dimenzije epruveta se definiraju prema zahtjevima registra ili normi poštujući ograničenje ispitnog uređaja koje se odnosi na maksimalnu silu razvlačenja, u ovom slučaju 50 kN. Kod ispitivanja provedenih u sklopu izrade završnog rada izabrane su dimenzije prema normi DIN 50125 prikazane tablicom 1.

**Tablica 1. Dimenzije za izradu epruveta**

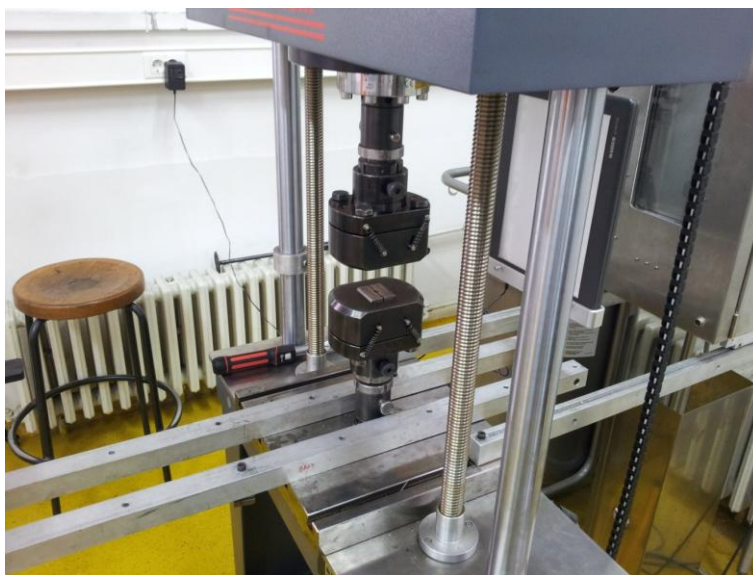
Veličina	$d_0$	$d_1$	$L_0$	$L_c$	$L_u$	$r$	$h$
Dimenzija [mm]	8	10	40	48	115	10	30



**Slika 6. Epruvete okruglog presjeka**

### 2.1.2. Mjerna oprema

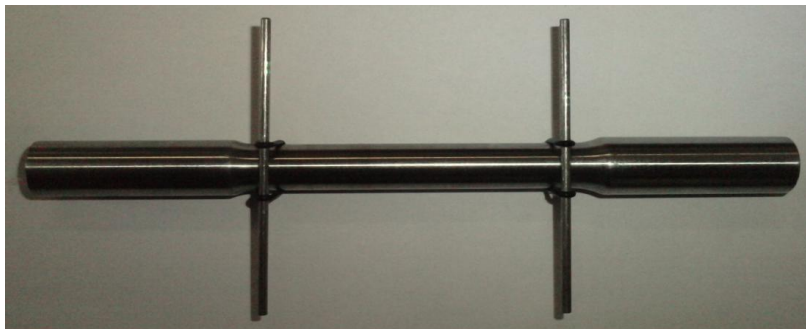
Pri određivanju mehaničkih svojstava materijala važno je koristiti preciznu mjernu opremu i instrumente. Kao što je ranije navedeno, ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, a sam pokus se odvijao na statičkoj kidalici MESSPHYSIK BETA 50-5 koja ostvaruje maksimalnu silu opterećenja od 50kN, prikazana slikom 7.



**Slika 7. Kidalica Messphysik Beta 50-5**

Na početku ispitivanja potrebno je unijeti sve potrebne parametre poput brzine ispitivanja, srednjeg promjera odnosno poprečnog presjeka epruvete, temperature i ograničenje uređaja (maksimalni hod iznosi približno 25mm). Parametri se unose u računalni program koji upravlja kidalicom.

Naprezanje i istezanje su dva glavna parametra iz kojih se računa većina mehaničkih svojstava tijekom jednoosnog testiranja. Naprezanje se dobiva opterećivanjem mjernog uzorka, dok se istezanje dobiva iz relativnog pomaka dviju odabranih točaka na epruveti. Pomak epruvete, odnosno deformacija materijala, se prati koristeći dva markera koji se postavljaju na epruvetu (slika 8).

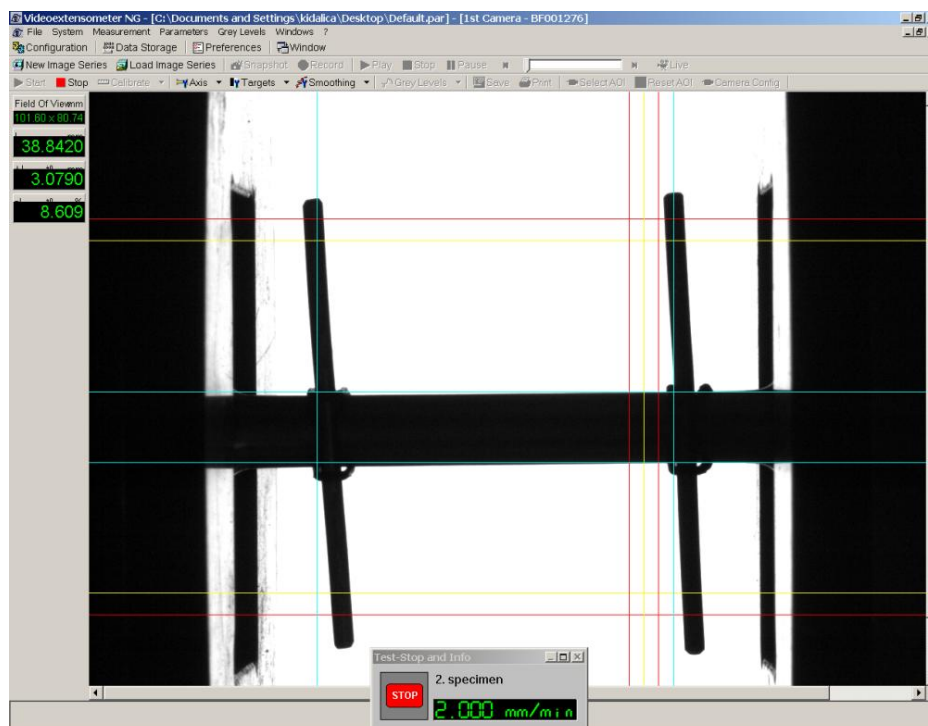


**Slika 8. Markeri na epruveti**

Njihov međusobni razmak bilježi uređaj koji se zove ekstenzometar. Postoji više vrsta ekstenzometara, međutim razvojem tehnologije nastala je nova generacija ekstenzometara gdje se ističu dva osnovna tipa: videoekstenzometar i laserski ekstenzometar. U ovom ispitivanju deformacije materijala mjerene su videoekstenzometrom (slika 9) koji pomoću prikupljenih podataka iz softvera optički traži najuži presjek epruvete na temelju kojeg se kasnije može generirati i stvarni dijagram *naprezanje - istezanje*.



**Slika 9. Videoskenzometar**



Slika 10. Programsko sučelje videoekstenzometra

## 2.2. Provedba pokusa

U eksperimentu su korištene tri epruvete okruglog presjeka. Mjere se promjeri vrata epruveta na tri mjesta (vrh, sredina i dno) pomičnim mjerilom „šublerom“, zatim se pomoću njihove srednje vrijednosti računa površina poprečnog presjeka epruvete. On je uz silu opterećenja najbitnija veličina za određivanje naprezanja. U tablici 2 dane su dimenzije promjera epruvete te njihova površina.

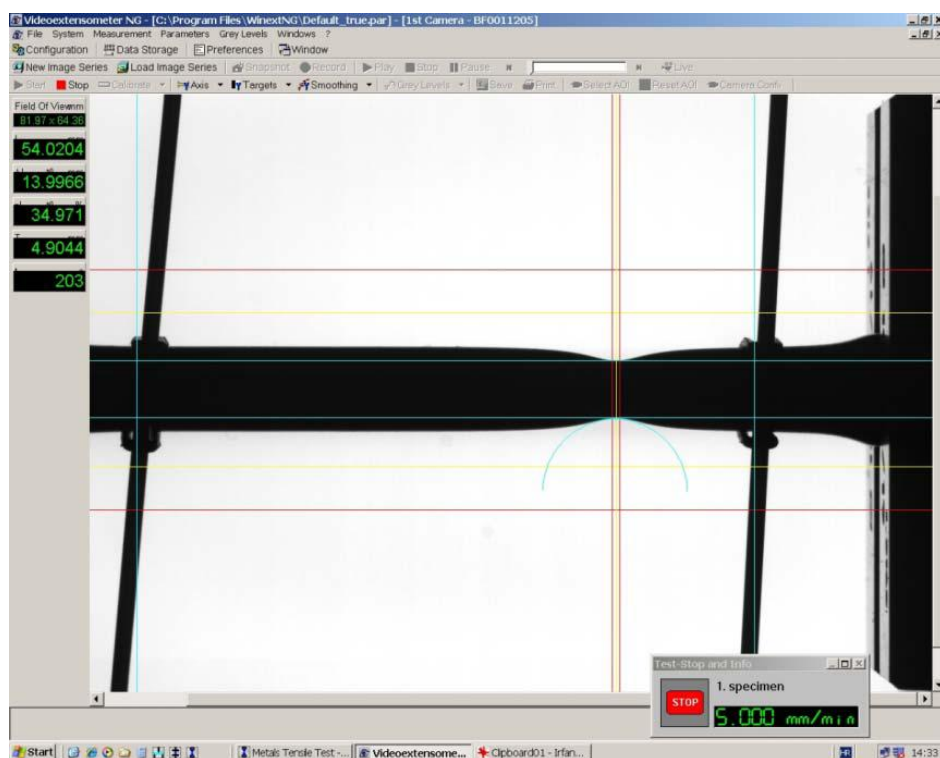
**Tablica 2. Dimenzije epruveta korištenih u eksperimentu**

Epruveta	Promjer [mm]				Površina [mm <sup>2</sup> ]
	gore	sredina	dolje	srednji	
E1	7,98	8,00	7,98	7,9867	50,098
E2	8,02	8,00	8,00	8,0067	50,350
E3	8,03	8,01	8,00	8,0133	50,433

Epruvete se postavljaju u čeljusti kidalice na način da se najprije jedna glava epruvete postavi u gornju čeljust kidalice, zatim se ona, zajedno s epruvetom, spusti tako da se druga glava epruvete pričvrsti u donju čeljust kidalice. Nakon toga se čeljusti dodatno učvrste kako bi epruveta ostala nepomična i kako bi se nesmetano odvijao pokus. Bitno je naglasiti da je epruveta poslije tog dodatnog učvršćivanja u čeljusti podvrgnuta silom od otprilike 900 N. Prije provedbe pokusa ta se sila mora anulirati kako bi se izbjegao njen utjecaj na mjerenja i konačne rezultate.

Nakon unosa brzine odvijanja pokusa od 2mm/min i ostalih potrebnih parametara u računalni program koji upravlja kidalicom, može se započeti s pokusom.

Na slici 10 i 11 su prikazani pojava vrata i loma na epruveti prilikom statičkog vlačnog ispitivanja.



Slika 11. Programsko sučelje videoekstenzometra – prikaz vrata



Slika 11. Prikaz epruvete nakon loma

### 3. REZULTATI ISPITIVANJA STATIČKIM VLAČNIM POKUSOM

#### 3.1. Brodograđevni čelik povišene čvrstoće AH 32

U eksperimentu su korištene 3 epruvete jer je iskustvo pokazalo da se na taj način dobiju dovoljno pouzdani rezultati statičkog vlačnog pokusa koji se dobro poklapaju pa je nepotrebno koristiti veći broj epruveta.

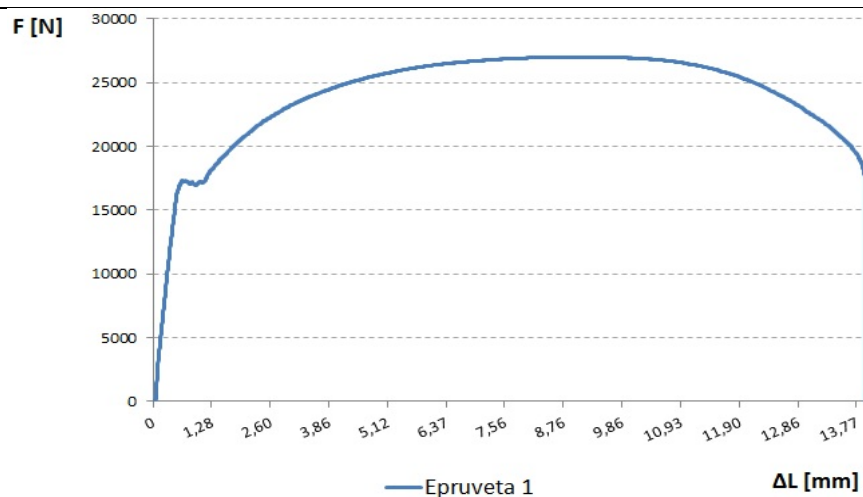
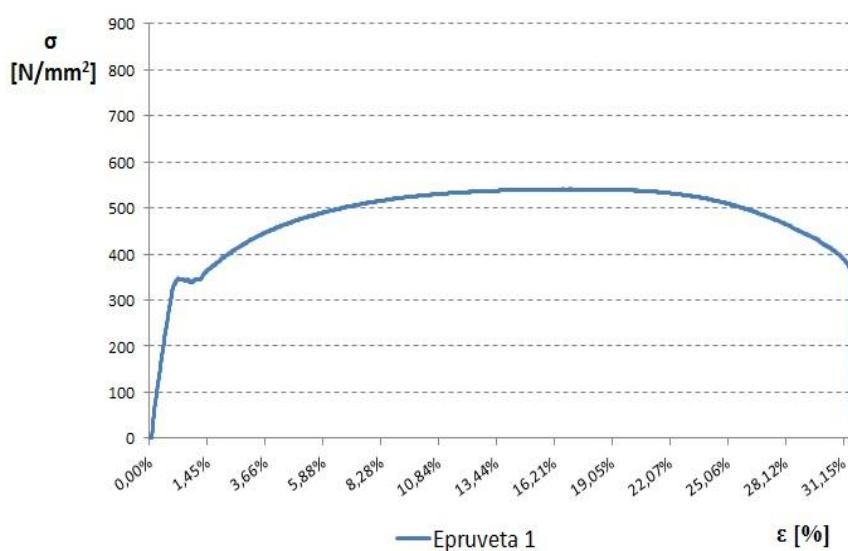
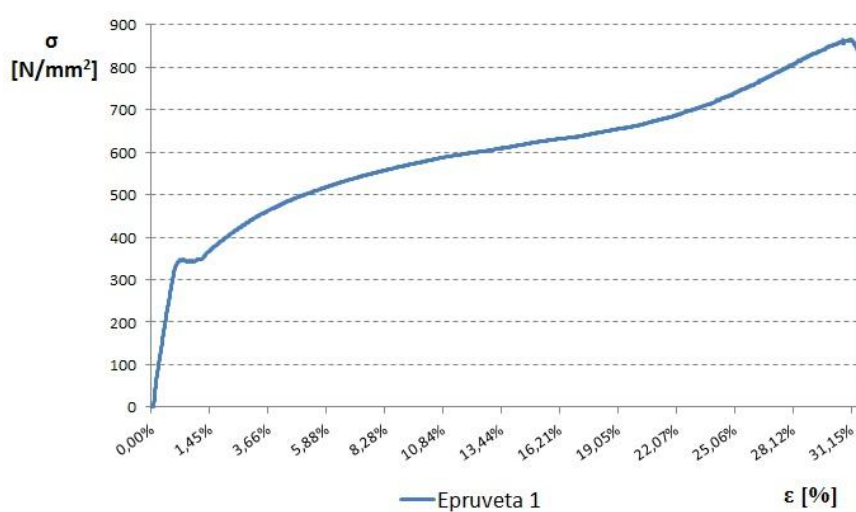
Tablica 3. Rezultati statičkog vlačnog pokusa čelika AH 32

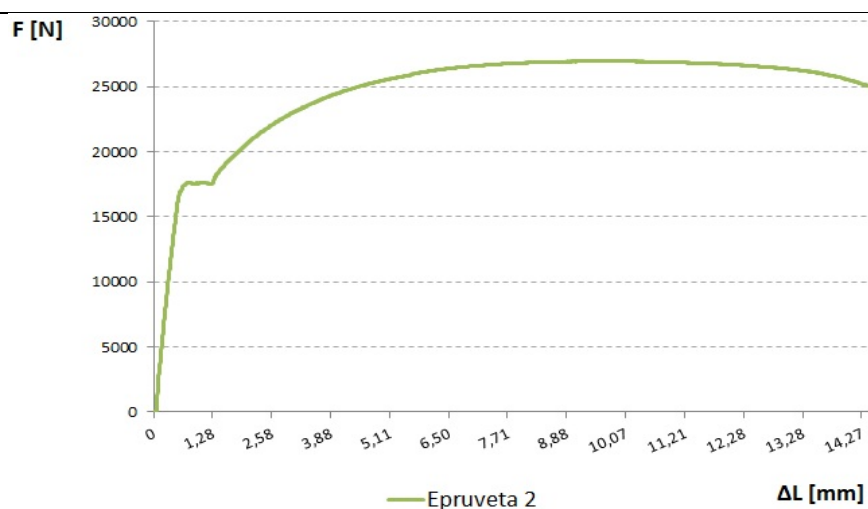
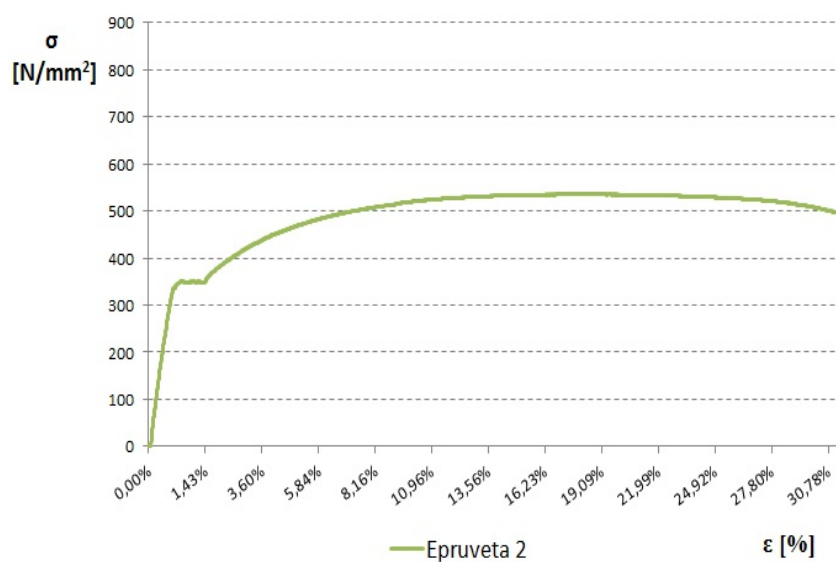
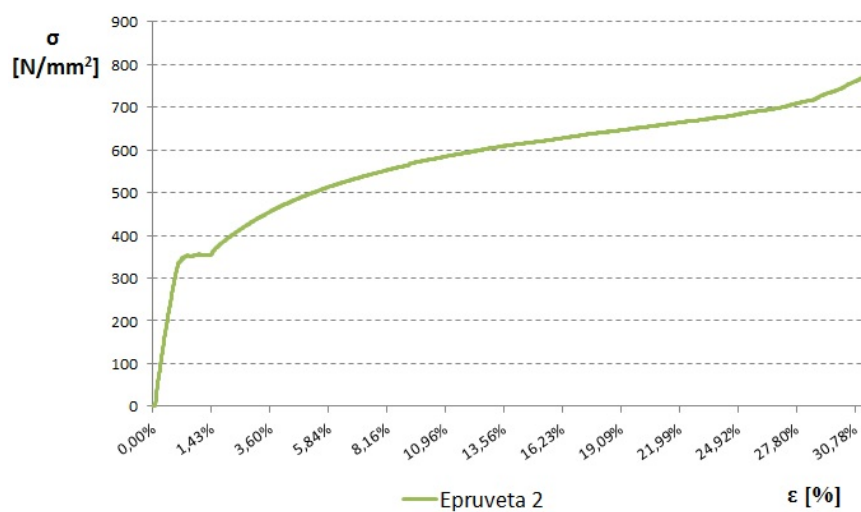
	E1	E2	E3	Srednja vrijednost
$d_0$ [mm]	7,9867	8,0067	8,0133	8,0022
$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	50,098	50,349	50,433	50,293
$F_m$ [N]	27 017,30	26 965,15	26 958,50	26 980,32
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	540,68	535,19	541,70	539,19
$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	347,27	346,43	348,51	347,40
$\epsilon_m$ [%]	16,98	18,20	17,52	17,57
$\epsilon_u$ [%]	31,83	31,21	31,19	31,41
$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	257355,0	248478,9	256061,1	253 965

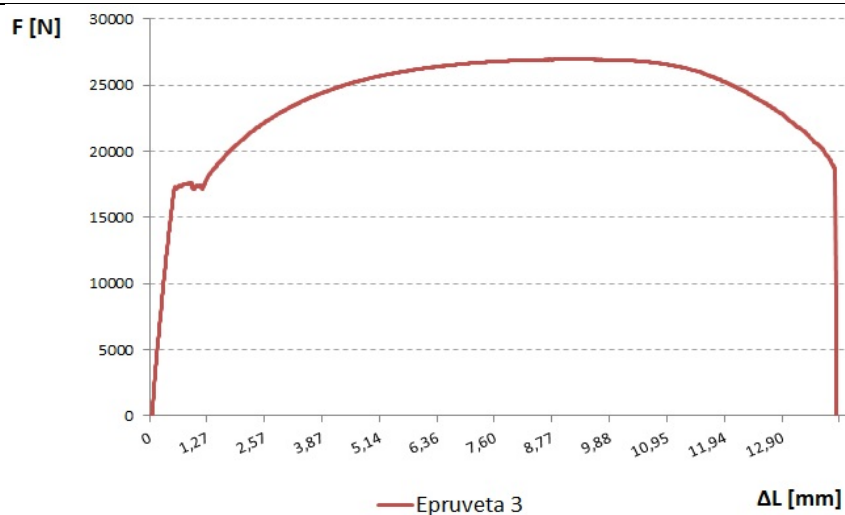
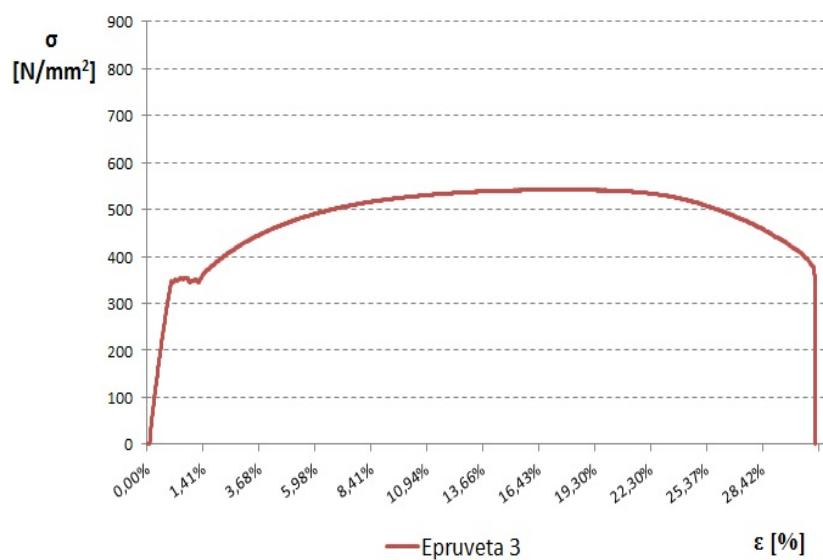
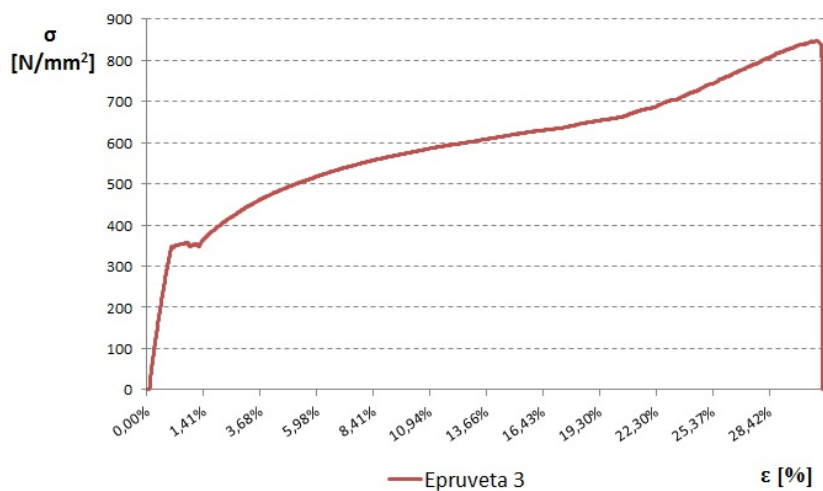
Vrijednost modula elastičnosti  $E$  pojedinih epruveta je dobivena kao srednja vrijednost nekoliko očitanih modula elastičnosti izračunatih preko jednadžbe pravca kroz dvije točke. Važno je napomenuti da se za elastično područje materijala u dijagramu  $\sigma - \epsilon$  uzima linearna ovisnost naprezanja i istezanja, međutim samo aproksimativno. Naime, prikazom dijagrama s velikim povećanjem lokalnih vrijednosti elastičnog područja materijala, vidljivo je da se radi o prilično nepravilnoj i valovitoj krivulji čiji nagib stoga varira ovisno o promatranim točkama. Zbog toga i stvarne vrijednosti modula elastičnosti prilično variraju pa njihov izračun predstavlja matematički problem koji se najbolje riješava aproksimiranjem te krivulje pravcem (Hookeov pravac). Nagib tog pravca se zove Youngov modul elastičnosti i on predstavlja omjer naprezanja i istezanja.

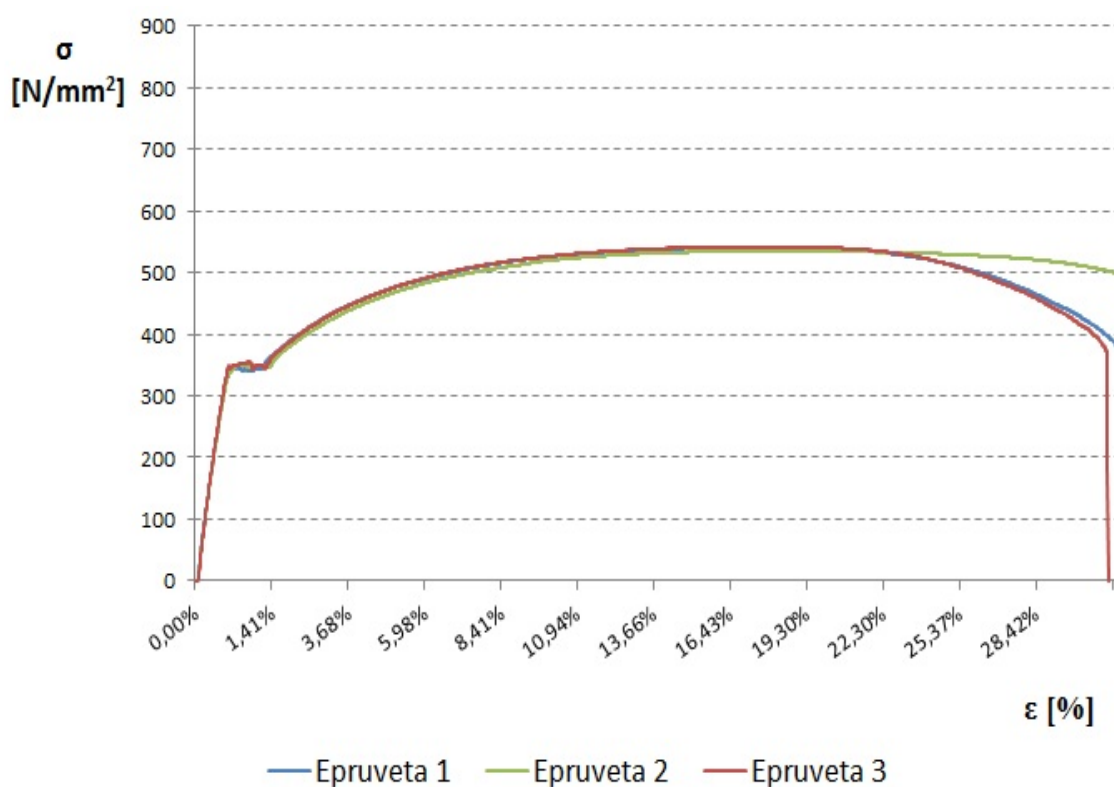
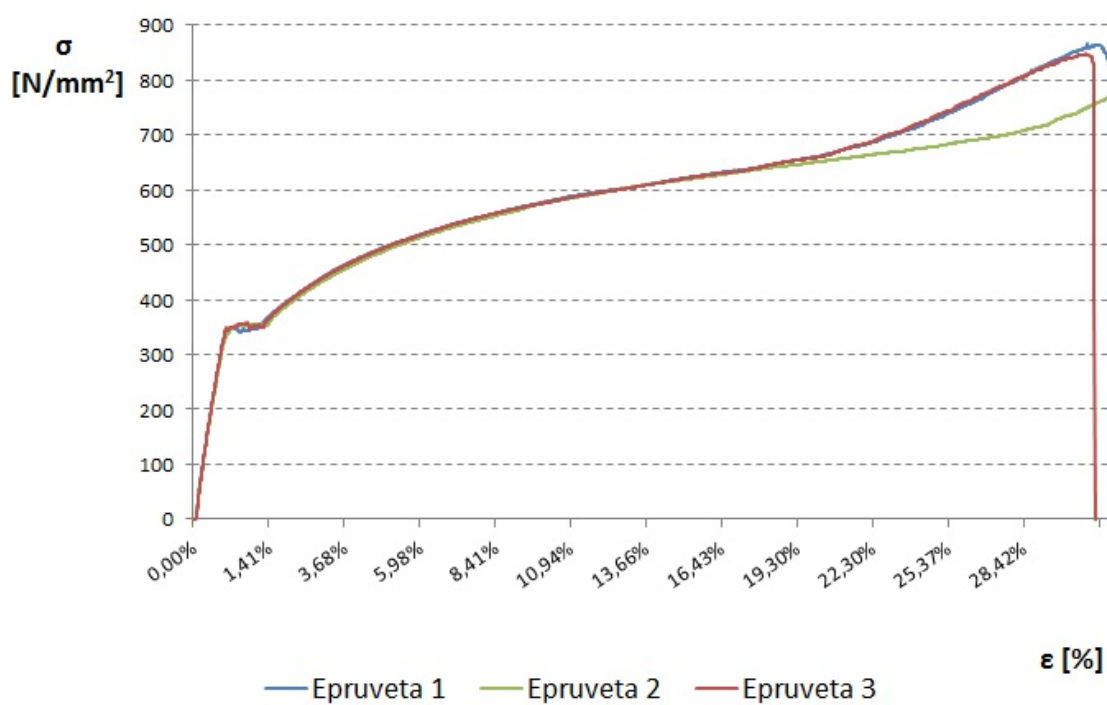
Osim tabličnog prikaza rezultata, moguć je i prikaz dijagramima. Prikazat će se dijagram *sila – produljenje*, konvencionalni dijagram *naprezanje – istezanje* i stvarni dijagram *naprezanje – istezanje* za svaku epruvetu.



Slika 13. Dijagram  $F - \Delta L$  za 1. epruvetuSlika 14. Konvencionalni dijagram  $\sigma - \varepsilon$  za 1. epruvetuSlika 15. Stvarni dijagram  $\sigma - \varepsilon$  za 1. epruvetu

Slika 16. Dijagram  $F - \Delta L$  za 2. epruvetuSlika 17. Konvencionalni dijagram  $\sigma - \varepsilon$  za 2. epruvetuSlika 18. Stvarni dijagram  $\sigma - \varepsilon$  za 2. epruvetu

Slika 19. Dijagram  $F - \Delta L$  za 3. epruvetuSlika 20 Konvencionalni dijagram  $\sigma - \varepsilon$  za 3. epruvetuSlika 21. Stvarni dijagram  $\sigma - \varepsilon$  za 3. epruvetu

Slika 22. Konvencionalni dijagram  $\sigma - \epsilon$  za sve 3 epruveteSlika 23. Stvarni dijagram  $\sigma - \epsilon$  za sve 3 epruvete

Iz prikazanih dijagrama (slike 21 i 22) vidljivo je da su rezultati naprezanja i istežanja dobiveni statičkim vlačnim pokusom na pojedinim epruvetama vrlo slični, što ukazuje na uspješno izveden pokus. Odstupanja se pojavljuju tek u plastičnom području prije pucanja epruvete; razlog je mjesto pojave vrata u odnosu na položaj markera što djelomično može utjecati na rezultate.

Valja također napomenuti da su dobivene vrijednosti modula elastičnosti pojedinih epruveta prilično velike u odnosu na nominalnu vrijednost za čelik. Razlog tomu leži u svojstvima samog materijala, odnosno u napretku tehnologije valjanja čelika.

### 3.2. Nominalne vrijednosti mehaničkih svojstava čelika povišene čvrstoće AH 32

Dobiveni rezultati ispitivanja statičkim vlačnim pokusom će se usporediti s pripadajućim nazivnim vrijednostima mehaničkih svojstava. U tablici 4 su dane nominalne vrijednosti relevantnih mehaničkih svojstava čelika povišene čvrstoće AH 32 prema Hrvatskom registru brodova.

**Tablica 4. Nominalne vrijednosti mehaničkih svojstava čelika AH 32 prema HRB-u**

$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_m$ [%]	E [N/mm <sup>2</sup> ]
440 - 590	315	22	206 000

U tablici 5 je prikazana usporedba stvarnih i nazivnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika povišene čvrstoće AH 32 i postotak njihovog međusobnog odstupanja.

**Tablica 5. Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti čelika AH 32**

	AH 32	Nominalne vrijednosti	Odstupanje [%]
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	539,19	440 - 590	/
$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	347,40	315	+ 9,33
$\epsilon_m$ [%]	17,57	22	- 20,14
E [N/mm <sup>2</sup> ]	253 965	206 000	+ 18,89

Rezultati pokazuju odstupanje stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika AH 32 od nominalnih za otprilike 10 - 20 %, što se približno podudara s ABS-ovim ispitivanjima u kojima je dobiveno odstupanje od 5 – 15 %. Predznak postotka odstupanja u tablici 5 ukazuje na to jesu li izmjerene vrijednosti mehaničkih svojstava veće (pozitivan predznak „+“) ili manje (negativan predznak „-“) u odnosu na pripadne nazivne vrijednosti.

Vlačna čvrstoća uzorka  $R_m$  se uklopila u raspon nominalnih vrijednosti za čelik AH 32, međutim vrijednost granice razvlačenja  $R_e^h$  se pokazala većom za nešto više od 9 % u odnosu na nominalnu, čime se dobiva dodatna „rezerva“ u graničnoj čvrstoći broda. Istezljivost uzorka  $\epsilon_m$  je ispala oko 20% manje, a modul elastičnosti  $E$  oko 19 % više od odgovarajućih nazivne vrijednosti.

#### 4. USPOREDBA MEHANIČKIH SVOJTAVA BRODOGRAĐEVNIH ČELIKA

Brodograđevni čelici pripadaju skupini konstrukcijskih čelika, a najzastupljeniji su u proizvodnji i primjeni nosivih zavarenih konstrukcija. Čelici koji se danas primjenjuju u brodogradnji dijele se prema mehaničkim svojstvima, tehnologiji izrade i kemijskom sastavu na kategorije A, B, D i E. Njihova je osnovna razlika u svojstvima udarne žilavosti pri različitim temperaturama (A i B vrijede za 0 °C, D za -20 °C, i E za -40 °C).

Brodograđevni čelici mogu biti normalne ( $R_e^h$  iznosi 235 N/mm<sup>2</sup>) ili povišene čvrstoće ( $R_e^h$  iznosi 315, 355 ili 390 N/mm<sup>2</sup>). Većina brodova se gradi od brodograđevnih čelika normalne čvrstoće, međutim radi smanjenja ukupnih troškova materijala i utroška pogonske energije došlo je do razvoja čelika povišene čvrstoće. Primjenom tih čelika smanjuje se masa konstrukcije zbog više granice razvlačenja i vlačne čvrstoće. Porast čvrstoće nije rezultat povećanoga udjela ugljika, već isključivo tehnologije prerade.

Kroz ovo će se poglavlje napraviti usporedba mehaničkih svojstava običnog brodograđevnog čelika i brodograđevnog čelika povišene čvrstoće AH 36 sa svojim nominalnim vrijednostima. Njihovo ispitivanje je istotako provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku. Također će biti prikazana i međusobna usporedba dobivenih odstupanja za sve spomenute brodograđevne čelike.

**Tablica 6. Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti običnog brodograđevnog čelika**

	Obični brodograđevni čelik	Nominalne vrijednosti	Odstupanje [%]
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	443,2	400 - 490	/
$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	319,7	235	+ 26,49
$\epsilon_m$ [%]	20,19	22	- 8,23
$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	207 900	206 000	+ 0,91

Iz tablice 6 može se zaključiti da kod običnog brodograđevnog čelika također postoje odstupanja stvarnih mehaničkih svojstava u odnosu na pripadne nominalne vrijednosti, međutim djelomično djelomično se razlikuju od odstupanja čelika povišene čvrstoće AH 32.

Za razliku od njega, granica razvlačenja  $R_e^h$  je veća za nešto više od 26% dok je istezljivost  $\epsilon_m$  manja za otprilike 8%. Vrijednost modula elastičnosti je u skladu s nominalnom vrijednosti za čelike.

**Tablica 7. Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti čelika AH 36**

	AH 36	Nominalne vrijednosti	Odstupanje [%]
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	563,7	490 – 620	/
$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	393,4	355	+ 9,76
$\epsilon_m$ [%]	16,6	21	- 20,95
$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	258 932,9	206 000	+ 20,44

Vidljivo je iz tablice 7 da je vlačna čvrstoća  $R_m$ , kao i u ostalim brodograđevnim čelicima, u rasponu njene nazivne vrijednosti, no granica razvlačenja  $R_e^h$  je veća za nešto manje od 10%. Istezljivost  $\epsilon_m$  je oko 21% manja, a modul elastičnosti  $E$  oko 20% veći od pripadne nominalne vrijednosti.

**Tablica 8. Usporedba odstupanja vrijednosti stvarnih mehaničkih svojstava brodograđevnih čelika u odnosu na pripadne nazivne vrijednosti**

	Obični brodograđevni čelik	AH 32	AH 36
$R_e^h$	+ 26,49	+ 9,33	+ 9,76
$\epsilon_m$	- 8,23	- 20,14	- 20,95
$E$	+ 0,91	+ 18,89	+ 20,44

Usporedba apsolutnih vrijednosti stvarnih mehaničkih svojstava pojedinih brodograđevnih čelika ne otkriva puno pa je tablicom 8 prikazana usporedba odstupanja vrijednosti mehaničkih svojstava od nominlanih.

Može se zaključiti da su vrijednosti odstupanja kod čelika povišene čvrstoće AH 36 približno jednake vrijednostima odstupanja kod čelika AH 32, dok su kod običnog brodograđevnog čelika odstupanja veća kod granice razvlačenja  $R_e^h$  i modula elastičnosti  $E$ , a manja kod istezljivosti  $\epsilon_m$ .



## 5. ZAKLJUČAK

Mehanička svojstva materijala su od velikog značaja jer se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i konstrukcija. Iz tog je razloga bitno provesti odgovarajuća ispitivanja pa je u sklopu završnog rada napravljen statički vlačni pokus čelika povišene čvrstoće AH 32 koji se koristi u brodogradnji. Usporedbom rezultata ispitivanja pojedinih epruveta, uočava se njihovo dobro poklapanje, što ukazuje na uspješno proveden pokus i na činjenicu da je Laboratorij za eksperimentalnu mehaniku u potpunosti opremljen za ovakvu vrstu ispitivanja.

Na temelju provedenih ispitivanja statičim vlačnim pokusom može se reći da je potvrđena polazna postavka o višim stvarnim vrijednostima mehaničkih svojstava čelika u odnosu na nominalne. Usporedbom stvarnih mehaničkih svojstava brodograđevnog čelika povišene čvrstoće AH 32 s nazivnim vrijednostima, ustanovljena je vrijednost granice razvlačenja otprilike 9 % veća od njene nazivne vrijednosti. Slično vrijedi i za čelik AH 36 čija je granica razvlačenja veća za otprilike 10 %, međutim ispitivanja običnog brodograđevnog čelika su pokazala nešto veće odstupanje granice razvlačenja, približno 26 %. Sličnosti u odstupanju kod brodograđevnih čelika povišene čvrstoće su također vidljivi u istezljivosti, gdje kod čelika AH 32 iznose oko 20 % a kod čelika AH 36 oko 21 % manje od nazivnih, te u modulu elastičnosti čije je odstupanje kod oba čelika oko 20 % veće od nazivne vrijednosti. Za razliku od čelika AH 32 i AH 36, ispitivanja provedena na običnom brodograđevnom čeliku su pokazala da je istezljivost manja od nazivne vrijednosti za otprilike 9 %, dok je modul elastičnosti u granicama nazivne vrijednosti. Dakle, može se ustanoviti da su eksperimentalno dobivene vrijednosti mehaničkih svojstava običnog brodograđevnog čelika puno bliže nazivnim vrijednostima brodograđevnog čelika povišene čvrstoće AH 32, a da su eksperimentalne vrijednosti mehaničkih svojstava čelika povišene čvrstoće AH 32 bliže nazivnim vrijednostima čelika povišene čvrstoće AH 36.

Za buduća istraživanja bilo bi korisno vršiti ispitivanja na uzorcima drugih makroprostora broda poput krmenog ili pramčanog pika, strojarnice, ili oplata dna i palube koji su najopterećeniji dijelovi brodskog trupa.

## **LITERATURA**

- [1] FRANZ M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1998.
- [2] ŽIHA K.: Digitalni udžbenik iz Konstrukcije broda, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [3] ŽIHA K., KODVANJ J., LJUBENKOV B., BAKIĆ A.: Značaj eksperimentalne mehanike u brodogradnji, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [4] DUPOR N.: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [5] MRĐEN I.: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2012.